

*** NOTICES ***

JPO and NCIPi are not responsible for any damages caused by the use of this translation.

1. This document has been translated by computer. So the translation may not reflect the original precisely.
2. **** shows the word which can not be translated.
3. In the drawings, any words are not translated.

DETAILED DESCRIPTION

[Detailed Description of the Invention]

Technical field to which single-mode-optic-fiber invention belongs This invention relates to the single mode optic fiber which can be used for transmitting radiation by high power more substantially than a thing realizable using the conventional means. This fiber does not receive a nonlinear effect or optical damage by higher power to the same range as an old optical fiber. Strictly, this fiber can be used as a single mode waveguide with a single mode fiber laser or single mode fiber amplifier.

Background of invention Since light is sent out to another point from a certain point, an optical fiber is used widely, and it is utilized for the field of a communication link, imaging, and a sensor. Usually, although a typical optical fiber is uniform if it meets the length, it is one long stranded wire of a transparent material from which a refractive index changes in the direction of a cross section. For example, the main core region with a higher refractive index is surrounded by the cladding fields where a refractive index is lower. Such a fiber is made from quartz glass and are surrounding the core made from a silica from which cladding of a pure silica mixed the impurity intentionally, and gathered the refractive index. Light is shut up in core or near it by the process of the total internal reflection which occurs on the boundary between a core and cladding.

Generally, this type of fiber is supporting two or more guidance modes (namely, multimode fiber) in which propagation is shut up by the core, and these modes move along with a fiber with different phase velocity. However, when the core is made remarkably small, only propagation in only one guidance mode (for example, single mode fiber), i.e., a basic mode, is confined in a core. That is, also when the conditions of the beginning of a fiber change and the fiber itself wears disturbance, such as lateral compression and bending, I hear that distribution of the light which appears from a fiber do not change, and it is. Usually, the fiber currently made so that the single mode light whose wavelength is 1500nm may be conveyed contains several% of germanium dopant in the core whose diameter is 9 micrometers. Recently, the photon crystal fiber (PFC) containing cladding made from the transparent ingredient by which the array of a hole is ****(ed) along with the die length of a fiber is developed (J. optical letter 21 (1996) 1547 page besides C. night, and optical letter 22 (1997) 484 page by ERATA). A hole is arranged in a periodic array in a longitudinal direction, it fills up with the ingredient with a refractive index lower than the refractive index of the remaining part of cladding, and the core of a fiber consists of the transparency field which breaks the periodicity of cladding. Usually, air is [hole] full of both a core and cladding with the product made from pure quartz glass. The width of face of a flat surface to the flat surface of 5 micrometers and the whole fiber of the diameter of a core is 40 micrometers about, and spacing of a hole is 2 thru/or 3 micrometers. If the diameter of the air vent of a fiber is fully small compared with the pitch or spacing between holes, it will show the core of a fiber to light by the single mode.

The single mode fiber is more advantageous than a multimode fiber in the field of a long-distance communication link, laser power sending out, and much sensor application by the reason the problem of severe dispersion which the lightwave signal conveyed with a fiber moves in only one mode, and occurs with a multimode fiber by that cause is avoidable. Furthermore, on given wavelength, the intensity of

light covers a single mode fiber, it is smooth and the single thing according to well-known eternal distribution is guaranteed. how as for this, light is discharged by the fiber, and a fiber -- a certain disturbance -- winning popularity (example: time amount change) -- being alike -- it is unrelated. Since the light in which any fiber passes through the inside of it is attenuated unescapable in much application, for example, it is that it is useful that an optical fiber can convey as much optical power as possible. For example, when detection sensibility is fixed, the die length of a communication link can be lengthened by increasing the radiant power input to a fiber. Moreover, if path attachment of the light can be carried out via a fiber without using the conventional optical system, there will be a lot of high-power laser system which can be made simpler in the application on industry. However, there is a limitation in the amount of the light which can be conveyed to predetermined time with a known optical fiber.

With the conventional fiber which consists of the core region surrounded by the cladding field where a refractive index is low, when the intensity of light in a fiber exceeds a threshold, the ingredient with which the fiber is made will suffer at the last the damage which recovery does not attach. or [degrading a lightwave signal, even if much intensity depending on a nonlinear optics process arises and it is harmless on a fiber when strength is low] -- or it may also be destroying.

By enlarging the dimension of the core in a fiber, the intensity of light in the fiber to given power is reduced, before this reaches the threshold for a nonlinear process, big power is conveyed, and these problems are made, and can also be eased. However, a fiber will become the many modes if only the diameter of a core is enlarged. This can also be compensated by reducing the difference of the refractive index of a core and cladding. However, as a result, it becomes difficult to cover the whole core and to secure the homogeneity of doping. Moreover, the small fiber of a refractive-index difference tends to receive loss of light with deflection. Therefore, even if it enlarges the dimension of a core and makes the power capacity of a single mode fiber increase, there is a limit in the range of the dimension.

Some of nonlinear effects get worse by containing a dopant in a core, and, thereby, an ingredient becomes [these] easy to be influenced increasingly. From higher power, the doped fiber becomes easier to suffer the damage which recovery does not attach. A fiber becomes easy to suffer damage of ionization radiation from existence of a dopant increasingly, and this is also a technical problem in atomic industry. It has fought against this technical problem by making a core the product made from a pure silica. Total internal reflection is held by adding a dopant to cladding and making it reduce the refractive index, and since the light conveyed within cladding becomes less than what is conveyed by incore, it can convey bigger power. However, the light which has the inside of doped cladding conveyed also has a limitation also in this according to the fact of still existing.

Furthermore, since light needs to converge to a small spot and it becomes large in conventional Fiber compared with the case where the strength in the end side of a fiber has a large-sized core in order to connect high power laser with a fiber efficiently, there are many problems. If the damage on optics is near the fiber an end side or near it, the power of the radiation which can be discharged in it will receive a limit frequently (S. applied optics 24 (1985) 3140 page besides W. Allison). There is the maximum continuous wave (cw) power attained with the old single mode fur bar only at about 15 W.

Outline of invention This invention conquers the incompatible problem of transmitting high-power radiation using the fiber of a conventional type, maintaining the behavior of a single mode. Strictly, this fiber may be used as a waveguide for sending out radiation to another point from a certain point, and may be used by the fiber amplifier or the fiber laser. This fiber can support propagation of radiation of the single mode in the range whose maximum power is 100W thru/or 2kW. Furthermore, if the core is not doped, the inclination to receive the damage whose recovery does not attach a core by high brightness as compared with a conventional-type (doped) fiber also becomes low. With this fiber, the effectiveness of a nonlinear optics process is reduced, and the high-power signal output from Fiber follows, and does not receive degradation. This fiber is useful at the point that there is also no need of converging to small beam-spot size, and high-power radiation is efficiently connected into a fiber.

According to one mode of this invention, the optical fiber for transmitting radiation The core whose diameter of a core it has core refractive index n and die-length l , and is at least 5 micrometers and which consists of transparent core materials substantially, Are the cladding field which surround the die length

of core materials, and a cladding field changes from the transparent 1st cladding ingredient to the real target which has the 1st refractive index. Since the transparent 1st cladding ingredient is covered substantially at the die length, the hole of a periodic array is ****(ed) substantially and the hole consists of such a cladding field that has the 2nd refractive index smaller than the 1st refractive index. The radiation input to optical fiber is transmitted by propagation of a single mode along with the die length of core materials.

If the diameter of a hole is separated only from the pitch λ of spacing by d , since d/λ is fixed asset to net worth ratio substantially, an optical fiber serves as a single mode regardless of input radiation wavelength, no matter a pitch λ may be what value. This invention follows and offers the advantage that a fiber can be made into a single mode, also to which wavelength covering the expanded wavelength range as compared with what is probably realizable using the conventional-type fiber. This is because a fiber is a single mode to fixed-asset-to-net-worth-ratio d/λ and is continued also to which wavelength of the expanded range.

As for the transparent 1st cladding ingredient, it is substantially desirable to have the refractive index which is not smaller than the refractive index of a core. In a certain desirable example, a core diameter is at least 10 micrometers. Furthermore, in the another desirable example, the diameter of a core is at least 20 micrometers.

In the example with this invention, at least one hole under array cannot be found, and it forms the core of an optical fiber. The hole is arranged in general by the hexagon.

A hole may be a vacuum field or may be filled up with the 2nd cladding ingredient. For example, if the 2nd cladding ingredient is substantially transparent, which ingredient is sufficient as it, and it may be air, other gases (example: hydrogen and hydrocarbon), a liquid (example: water, other water solutions, or coloring liquid), or a solid-state (example: glass ingredient with which a refractive index differs from the 1st cladding ingredient).

The transparent 1st cladding ingredient has the 1st uniform refractive index substantially, and core materials have the uniform core refractive index substantially. The same ingredient is substantially [as core materials] sufficient as the transparent 1st cladding ingredient. For example, inside it is the transparent 1st cladding ingredient as substantially as core materials, either at least may be a silica. As for the diameter of a hole, it is desirable that it is more than the wavelength of the light guided in the inside of a fiber.

In the example with this invention, transparent core materials may also contain substantially the dopant ingredient which is rare earth ion like an erbium.

According to the 2nd mode of this invention, the fiber amplifier for amplifying radiation of a signal. It is the optical fiber of a certain die length stated to here for receiving signal radiation of the selected wavelength and transmitting said signal radiation along with the die length. Optical fiber of such a certain die length with which core materials contain the dopant ingredient along with the at least 1 section of the die length. So that the part of said doped core materials may amplify signal radiation under actuation of pump radiation. The source of the radiation for emitting pump radiation of different wavelength chosen towards the input to the optical fiber of the die length concerned. It consists of the wavelength selection transmission means for outputting alternatively the signal radiation by which it was amplified from fiber amplifier in order to transmit pump radiation to the optical fiber of the die length concerned alternatively.

For example, the wavelength selection transmission means consists of the input lens for converging radiation and the output lens, and the dichroic mirror for transmitting alternatively the amplified input radiation to which it should be outputted from fiber amplifier since pump radiation is alternatively reflected into an optical fiber. In another example, the wavelength selection transmission means consists of the fiber directional coupler which has a wavelength dependency response.

The dopant ingredient may consist of rare earth ion like erbium ion.

According to other modes of this invention, the fiber laser for outputting laser radiation. It is the optical fiber of a certain die length which states the laser radiation which has the selected wavelength to here for transmitting alternatively along with the die length. Optical fiber of such a certain die length with which

core materials contain the dopant ingredient in the at least 1 section of the die length So that signal radiation may be amplified under actuation of pump radiation of said doped core materials The source of the radiation for emitting pump radiation of different wavelength chosen towards the input to the optical fiber of the die length concerned, The wavelength selection transmission means for outputting alternatively the signal radiation by which it was amplified from the fiber laser in order to transmit pump radiation to the optical fiber of the die length concerned alternatively, It consists of the feedback means for feeding back a part of amplified laser radiation alternatively so that said amplified laser radiation may pass repeatedly along with the die length of an optical fiber and may be amplified further.

The dopant ingredient may consist of rare earth ion like erbium ion.

In the example with a fiber laser, both feedback means may change to the wavelength selection transmission means list from the dichroic mirror of two sheets, the dichroic mirror of its that is put on a different location along with the die length of an optical fiber, and the doped core materials are placed between the locations of the dichroic mirror of two sheets.

In the example instead of a fiber laser, both the feedback means and the wavelength selection transmission means consist of two fiber grids formed in two different locations along with the die length of an optical fiber so that the doped core materials may be placed between two fiber grids.

this voice of this invention -- another example [like] -- a fiber laser -- a ring resonator fiber laser -- you may be -- that case -- feedback means It consists of the means for carrying out the orientation of the light which appears from one [which has the doped core materials] edge of the die length of an optical fiber to the edge by the side of another side of the die length of an optical fiber.

According to another mode of this invention, the system for transmitting radiation by propagation of a single mode Each optical fiber of a certain die length carries out sequential reception of the input radiation from the optical fiber of a certain front die length. It is continuously arranged at the optical fiber of a certain following die length so that sequential transmission of the output radiation may be carried out. Each die length It consists of the optical fiber of die length with the plurality stated to such here separated by the magnification means for amplifying the radiation output from the optical fiber of a certain die length so that it may be maintained more than the power to which the power of the radiation transmitted with the optical fiber of a certain die length was set beforehand.

In a certain desirable example, the magnification means consists of fiber amplifier which is described here.

Easy explanation of a drawing It is only for instantiation although explained about this invention, referring to the following drawings from this.

Drawing 1 is the schematic diagram of conventional-type step index optical fiber.

Drawing 2 a and 2b are the schematic diagrams of a photon crystal fiber.

Drawing 3 shows the advantage of combining radiation to a comparatively big photon crystal fiber core.

Drawing 4 shows large-sized core photon crystal fiber amplifier.

Drawing 5 shows the wavelength selection coupler equipment used for the large-sized core photon crystal fiber amplifier shown in drawing 6 .

Drawing 6 and 7 show the configuration of the fiber laser which consists of a large-sized core photon crystal fiber.

Drawing 8 shows the stack and draw processing which are used in order to make a large-sized core photon crystal fiber.

This invention is cleared and drawing 9 shows the SEM image of the central field of the end side of a large-sized core photon crystal fiber.

Drawing 10 shows the near pattern of the output of the photon crystal fiber shown in drawing 9 .

Drawing 11 shows the near distribution plot of the end side of a photon crystal fiber.

Drawing 12 shows the effective V value about a photon crystal fiber.

Detailed description The step index fiber 1 from the former consists of the circular core 2 which was surrounded with the cladding ingredient 3 which has the uniform refractive index n_2 and which has a uniform refractive index n_1 and a uniform radius r about drawing 1 . The number of the guidance modes which a step index fiber 1 supports about the light of wavelength λ is decided by the V value, and

$$V_1 = \frac{2\pi r}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad \text{数式 1}$$

is V here,

It is alike and is given more.

V of a fiber is a single mode only when smaller than 2.405. Therefore, a single mode fiber is usually operated so that V may become smaller than 2.405.

In conventional-type step index optical fiber as shown in drawing 1, the ingredient with which a fiber is made will suffer the damage which recovery finally does not attach, when the intensity of light spread along with a fiber exceeds a threshold. When the intensity of light is low, many nonlinear optics processes occur, and a lightwave signal may be degraded or it may destroy further. Although these problems are eased by enlarging the dimension of the core 2 of a fiber 1, a fiber will become the many modes if only the radius of a core is enlarged. Therefore, in order to compensate this, the difference of the refractive index between a core 2 and cladding 3 must also be reduced to coincidence.

The refractive index of a core 2 and cladding 3 is controllable by adding a dopant into an ingredient. It becomes difficult to cover the result, however a core region 2, and to secure the homogeneity of doping. Furthermore, the fiber with the small difference of a refractive index tends to receive loss of light with deflection. Therefore, in order to make the power of radiation which can transmit a fiber, or the power capacity of a fiber increase, even if it increases the dimension of a core, there is a limit in the range of the dimension. Drawing 2 (a) shows the optical fiber 4 of this invention which conquers the power capacity problem which accompanies the conventional fiber. An optical fiber 4 consists of the transparent 1st cladding ingredient 5 substantially, die-length l of a fiber is covered, and the array of a hole 6 is ****(ed). The hole 6 is arranged in the array periodic in a longitudinal direction, and you may fill up with the 2nd ingredient which has a refractive index smaller than the 1st cladding ingredient. A solid-state, a liquid, or a gas ingredient is sufficient as this 2nd ingredient, and the hole may be emptied instead (namely, vacuum). For example, core materials 7 and the 1st cladding ingredient 5 are the products made from a pure silica, and air may be [ingredient] full of the hole 6.

The core region 7 of a transparent ingredient is in the real target which breaks the periodicity of the array of a hole 6 in a core substantially [a fiber cross section]. For example, the central hole of an array is lost and the location of the lost hole or the surrounding 1st cladding ingredient of the location forms the core 7 of a fiber 4. The core of a fiber has a diameter c, as shown in drawing 2 (b). The core diameter c of a fiber is taken on the purpose of this explanation in the distance between the core of one hole which adjoins a core substantially, and the core of the hole which adjoins a core in the diameter top opposite side.

Although the array of a hole forms six (as [show / in drawing 2 (a) / for example,]) square shape mold patterns, other hole patterns are considered.

With the conventional photon crystal fiber, the outside width of face w of a fiber is about 40 micrometers, and the pitch (pitch lambda) of a hole is 2 micrometers about. A solid-state core region has the diameter of 4 micrometers usually smaller than the diameter of the core of the conventional single mode fiber (refer to drawing 1) used for example, for a long distance communication link. However, the photon crystal fiber of this dimension can usually transmit only the radiation whose power is 10 thru/or 20W. Therefore, such a fiber is not fit for using it with the high-power laser system with which output power is set to at least 1kW.

According to the 2nd mode of this invention, the single mode optic fiber for sending out radiation to another point from a certain point consists of the photon crystal fiber at least 5 micrometers of whose diameters of the core 7 as shown in drawing 2 are at least 10 micrometers desirably. When the core diameter of a photon crystal fiber is enlarged, a result whose amount of the power which can be transmitted increases is brought, although it is dependent on the concrete application of a fiber, it is still larger, for example, it is desirable [the diameter of a core] that it is in the range of 20 to 50 micrometer. In the light of the purpose of this specification, the photon crystal fiber with which a core has at least 5-micrometer central impervious core 7 will be called a "large-sized core photon crystal fiber."

Furthermore, a large-sized core photon crystal fiber can spread radiation by the single mode. Therefore,

this fiber can use radiation of power higher than what the optical fiber of a conventional type was used with the large-sized core dimension, and has been realized to until in order to transmit by propagation of a single mode.

The large-sized core photon crystal fiber whose core diameter is 50 micrometers can support the continuous wave radiation whose power is 2kW about. This is equivalent to the value acquired by inserting the best experimental result attained with the conventional fiber. In the conventional silica step index fiber as shown in drawing 1, the maximum continuous wave strength of the radiation which can be transmitted before eternal damage starts is 100MWcm⁻² (W. Lucy, optical engineering 34 (1995) 2361-2364 page). It carries out considerable [of this value] only to the about [100W] theoretical maximum power of ** to the core diameter of 12 micrometers. However, the maximum continuous wave (cm) power which the theoretical maximum power decreased remarkably when radiation was combined with a fiber, and loss occurred, and was practically attained with the conventional single mode fiber in fact is only about 15W.

Still more nearly another advantage of a large-sized core photon crystal fiber is a point which combining radiation with a fiber can realize more easily. drawing 3 (a) and 3 (b) -- as one example -- laser radiation 8 -- (a) -- the schematic diagram in the condition of being inputted into the conventional-type photon crystal fiber and (b) large-sized core photon crystal fiber which have a comparatively small core by the means of a lens or lens equipment 9 is shown. If it seems that the core of the large-sized core photon crystal fiber 7 is equal to the diameter of the beam of light of laser radiation about drawing 3 (b), radiation 8 can be inputted into a fiber even if it does not use a lens 9.

A single mode large-sized core photon crystal fiber is applied to laser processing which needs to irradiate high-power laser radiation at the ingredient which an application is in the high-power laser system used in an industrial field, for example, is processed. Since it is inconvenient to move laser and it is not practical in order to change the direction of a laser beam, in order to guide laser radiation in the predetermined direction, the conventional optical machine is used. High-power laser radiation can be guided without needing the optical machine which is complicated as for a large-sized core photon crystal fiber, and is bulky.

A large-sized core photon crystal fiber is applicable also to a communication link. The conventional optical fiber of the die length in sending out radiation to another point from a certain (as [show / in drawing 1]) point until now is used. Since the strength of radiation is decreased as it is transmitted along with a fiber, the power of the radiation which uses a fiber amplifier or a repeater for various points which meet the die length of a fiber, and is transmitted is strengthened periodically. Such a device detects the weak signal (namely, signal with which power became low) which appears from a section with an optical fiber link, amplifies it, and sends this amplified signal to the next section of a link. Before magnification is needed, a signal is more movable to a long distance through an optical fiber, so that the power which can support a fiber is large. Thus, spacing of a repeater is decided by the maximum power which can convey a fiber. however, that the maximum power which inside Ferber can convey degrades a signal also receives a limit according to the nonlinear optical effect of a dependency in a certain strength. If a core area is large, power can be made to increase to given strength. Since the maximum fiber core area can be used still realizing propagation of a single mode, thereby, spacing of a repeater can be limited to minimum.

Spacing of the standard repeater for fibers is 30km to given detectability ability criteria (O. 1363 - 1365 pages (1995) of IEEE photon technical letters besides ODOWIN). If a large-sized core photon crystal fiber is used for radiation transmission and the diameter of a fiber core is about set to 50 micrometers, it is enough even if spacing of a repeater spreads to 160km (when it is assumed that the power of a photon crystal fiber and a conventional-type fiber is equivalent). Thus, if a photon crystal fiber is used, transmission of a lightwave signal can be realized covering a longer distance at more convenient more few costs. Moreover, with a large-sized core photon crystal fiber, a fiber link can be used without the need for a repeater covering the distance for which the repeater is probably needed, when a conventional-type technique is used.

although it comes out about drawing 4, a large-sized core photon crystal fiber can be used also into an

amplifier system. A large-sized core photon crystal amplifier consists of the fiber 4 of a certain die length which has the core (not shown) usually doped with a small amount of dopant ingredient like an erbium. This fiber amplifier also contains the pump radiation source 13 for releasing the wavelength selection coupler (WSC) 12 and the pump radiation 14. The pump radiation 14 has short wavelength as compared with the wavelength of the input radiation 10, and is supplied to one end of the fiber 4 of the die length through WSC12. The input signal radiation 10 from the radiation source 11 or the optical fiber of a certain front die length is inputted into the fiber 4 of a certain die length in the end of the opposite side.

The purpose of WSC12 is inserting radiation of a certain wavelength (namely, pump wave length), without boiling, and passing through and diverting radiation of another wavelength (namely, input radiation wavelength). Therefore, the pump radiation 14 can be inputted along with the same fiber 4 as the signal radiation 10, without taking out any signal radiation 10 from a fiber 4. Since the pump radiation 14 excites the dopant ion of a fiber 4 incore, gain is offered when the wavelength of the input radiation 10 is longer. Therefore, the input radiation 10 is amplified. The wavelength selection coupler 12 transmits input radiation of long wavelength alternatively, and generates the output signal 16 amplified in this way. This output signal 16 is outputted through the fiber 15 of a certain die length. The wavelength selection coupler which can come to hand commercially usually consists of the input fiber and output fiber of a certain die length, among those an input fiber is a fiber doped from the former (as [show / in drawing 1]). In order to avoid that reinforcement is lost whenever a signal is inputted into WSC12 or is outputted from there in the large-sized core photon crystal fiber amplifier of drawing 4 , in a system, it is desirable to include only the large-sized core photon crystal fiber.

The equipment of a fiber is sufficient as anterior part like a fuse coupler, and if WSC12 has a wavelength dependency response, which fiber directional coupler is sufficient as it. Instead, one example of the optical equipment 17 which can be used for drawing 5 as a wavelength selection coupler is shown. For example, optical equipment consists of input output lens 18a, and 18b with each and a dichroic mirror 19. The include angle is attached to the mirror 19 so that the pump radiation 14 may be turned to input lens 18a, it may reflect and the input signal radiation 10 may be transmitted.

((Are shown in drawing 1) As) It consists of step index optical fiber, and 100kW peak power is realized with the fiber with which a core diameter represents with 20 micrometers the limitation of the conventional technique of transmitting pulse radiation of pulse duration for 1ns (P. 260 - 261 pages of meeting (1995) minutes about fiber optics communication besides NOCHI). If a fiber 4 uses the photon crystal fiber amplifier which has the core diameter which is 50 micrometers about and which is shown in drawing 4 , the pulse radiation which has a pulse for 1ns and at least 600kW peak power can be transmitted.

Otherwise, a large-sized core photon crystal fiber is utilizable for a fiber laser. Although others have the configuration of the fiber laser equipment which can use a large-sized core photon crystal fiber in large numbers, two configurations which can use a fiber laser are shown in drawing 6 and drawing 7 . For example, a large-sized core photon crystal fiber can be used for a ring resonator fiber laser, in that case, it is combined, and laser radiation will turn around the "ring" of a fiber, and will be transmitted, and the both ends of a fiber will be amplified continuously.

although it comes out about drawing 6 , the fiber laser in which an output of high-power radiation is possible has changed to the core region (not shown) from the large-sized core photon crystal fiber 4 of a certain die length which has a small amount of dopant like an erbium. The fiber laser contains output mirrors, two dichroic mirrors 22, i.e., an input mirror, 23 at one of the edges of a fiber 4 again. The radiation 24 from the source of the pump radiation 25 (example: laser) is inputted through the input mirror 22. This makes gain by exciting erbium ion in the core of a fiber to the fiber field 4 to which it was doped between mirrors 22 and 23. Spontaneity luminescence from the excited erbium ion generates the little signal radiation with wavelength longer than the pump radiation 24 in a fiber 4 (not shown in a fiber). Whenever it comes and goes along with a fiber, it is reflected by mirrors 22 and 23, and this signal radiation is amplified.

while the die taro IKKU mirror 22 transmits the pump radiation 24 typically -- signal radiation -- it

designs so that 99% may be reflected about -- having -- the dichroic mirror 23 for an output -- laser radiation -- it is designed so that 80% may be reflected about. Therefore, a signal Whenever radiation is reflected by the output mirror 23, a fraction also appears as an output signal 25. Since the source of laser radiation can be offered with the gestalt of the fiber which can be easily connected with the optical fiber of the die length which has **** as usual, it is easy to use a fiber laser. A fiber laser output more powerful than the thing using the optical fiber of a conventional type is realizable with the high-power capacity of a large-sized core photon crystal fiber.

The configuration instead of a fiber laser is shown in drawing 7, and it consists of the fiber grid 26 which has the function of a dichroic mirror (drawing 8). This configuration has the advantage that all are equipment of a fiber. The fiber laser containing a large-sized core photon crystal fiber has many configurations, and it does not have intention as being limited to two examples which the fiber use in such equipment illustrates. In another example, a large-sized core photon crystal fiber is used for a ring resonator fiber laser, it already connects with an end, laser radiation continues, and the end of a large-sized core photon crystal fiber is continuously amplified there involving the "ring" of a large-sized core photon crystal fiber.

The large-sized core photon crystal fiber 4 is made from the rod of quartz glass using repetitive stack - and - draw processing, as usually shown in drawing 8 (J. optical letter 21 (1996) 1547 page besides C. night and ERATA, optical letter 22 (1997) 484 page). Drawing 8 (a) shows the rod of the cylindrical shape of quartz glass 27, and has made the hole 6 (drawing 8 (b)) in the core along with the die length of a rod 8.

The page [6th] flat-surface section is started by the outside of a rod in a regular distance from the hole, and the rod 27 is made into what had the cross section of six square shapes in the circumference of the central hole 6. Extension shaping of the rod 27 is carried out to a glass tube 28 using a fiber drawing tower, and a glass tube 28 is cut by necessary die length. The stack of the glass tube 28 is carried out here, as shown in drawing 8 (c), the glass tube of a tortoise shell form array is formed, and this forms a fiber 4. The glass tube which exists in the center of an array does not have the hole made through the core, but forms the core 7 of a fiber 4. Here, extension shaping of the glass tube which the stack completed is carried out to a final fiber using a fiber drawing tower.

As long as it can also use an alternative manufacture technique, for example, can use the silica capillary of a cylindrical shape, these may be used as a basic fiber element (namely, capillary which already has a form of a glass tube 28). Thereby, the time and effort of the punching phase of stack - described previously and - draw processing or a logging phase can be saved.

A fiber 4 consists of the 1st cladding ingredient which can be extended [that it is transparent and] to a fiber (as [show / in drawing 8 (b)]) substantially. If core materials are substantially transparent, which ingredient is sufficient as them and they do not necessarily need to be the same as that of the 1st cladding ingredient. As for the refractive index of the 1st cladding ingredient, it is desirable that it is not below the refractive index of core materials.

empty, i.e., a vacuum, is sufficient as a hole 6 -- carrying out -- or the 2nd cladding ingredient which a refractive index can be low and can extend to a fiber, some the ingredients, i.e., 1st cladding ingredient, - or when extension shaping of the hole is carried out at the already small dimension, you may fill up with which ingredient which can be inserted into it. For example, the hole may be filled with air, other gases (example: hydrogen, hydrocarbon), the solid-state (example: a different glass ingredient which has a different refractive index from the 1st cladding ingredient), or the liquid (example: water, a water solution, coloring liquid). The 2nd cladding ingredient in a hole does not necessarily need to be transparent. The phrase a "hole" is not limited to the semantics of the lack field in the 1st cladding ingredient so that more clearly than this explanation.

If the diameter of the air vent in a fiber is fully small compared with the pitch or spacing between holes, it will show the core of a fiber to light by the single mode. As for the diameter of an air vent, it is desirable that it is smaller than the wavelength of the light guided in the inside of a fiber. As for spacing of a hole and a hole, it is desirable that it is 1/2 or less [of more than the quadrant of a core diameter and a core diameter].

spacing of a hole and a hole -- usually -- a core diameter -- about -- 2 micrometers -- it is 1.

The 1st cladding ingredient and the core may have the refractive index of homogeneity, and may have a different refractive index. For example, it may be filled up with an ingredient which lacks the central hole of an array, it not only makes it small or larger than other holes, but loses other holes, or is different. A core 7 may also be doped with dopant ingredients, such as an erbium or other rare earth elements, like [in the fiber laser shown in drawing 6 and drawing 7].

Drawing 9 shows the SEM image of the central field of the end side of cleared PCF. There is no central hole and the core with a diameter of 22 micrometers is in the condition that a boundary is defined by six innermost holes. Relative hole dimension d/λ of a fiber is 0.12 by width of face of 180 micrometers.

Drawing 10 shows the near pattern in the output of the large-sized core PCF shown in drawing 9 with a wavelength of 458 micrometers for incident light. An image is understood that it is saturated with the center section of the pattern and the description is weak at the end. The perimeter of a pattern is a concave and this is a place in contact with six innermost air vents.

In order that it might be discharged in a fiber and light with a wavelength of 458 micrometers might remove cladding mode, the liquid with which a refractive index is doubled was applied to structure. The output was observed whenever discharge conditions were changed. The many modes were not excited in the pattern soon and the output of PCF as shown in drawing 5 was not influenced. Even if the core diameter was 50 times the wavelength of incident light, the fiber was still a single mode. If scale doubling of this result is carried out to the wavelength of 1550nm, a core diameter will serve as a single mode also by the same PCF which is 75 micrometers.

He can understand the behavior of the large-sized core photon crystal fiber of this invention from the point of the effective refractive index n_2 of the cladding 5 in different wavelength. Drawing 11 (a) and 11 (b)

The near distribution plot of the end side 28 of the ***** crystal fiber 4 is shown, core materials 7 and the 1st cladding ingredient are silicas, and air is filled in the hole 6.

although it comes out about drawing 11 (b), in long wave length (example: 1500nm), the optical propagation which passes along a fiber 4 is that (refer to drawing 3 (b)) which does not fully project the array of a hole, and the considerable part of light spreads an air vent 6. For example, it follows, a pure silica receives refractive-index n_1 (namely, refractive index of a core 7), and the effective refractive index of a silica and a cladding ingredient 5 like air becomes small. although it comes out about drawing 11 (a), the light of the short wavelength (example: 600nm) spread along with a fiber 4 projects the array of a hole 6 clearly, and is substantially excepted from passing through and spreading a hole. The effective refractive index n_2 of the silica cladding 5 which encloses a core 7 follows, and is near by the refractive index (namely, refractive index of a core 7) n_1 of a pure silica.

Therefore, although it returns to a formula 1, based on the explicit dependence to wavelength λ , a V value becomes large, so that the wavelength of the light which passes through and spreads a fiber 4 becomes small. This increment is **.

なくとも部分的には因数 $(n_1^2 - n_2^2)^{1/2}$ を小さくすることにより補償され、ここ

It is alike and n_1 and n_2 are the effective refractive index of silica cladding, and the refractive index of a pure silica (core 7), respectively. Since this makes a V value what is seldom dependent on wavelength, it makes the wavelength range where V can become under a threshold over the multi-mode guidance for the structure expand.

If it restricts to short wavelength, the wavelength dependency of V not only becomes small, but will actually be excepted completely. About this, it is shown in drawing 12 and the graph of the effective V value (V_{eff}) of the fiber to change of the ratio to the wavelength λ of the pitch λ of a hole is shown. Each curve supports the given ratio to the pitch λ of the diameter d of a hole 6. A V_{eff} - d/λ curve is computed by calculating the effective refractive index n_1 of the cladding ingredient 5 first, and then calculating V_{eff} from a formula 1. The radius of a core 7 considers in the pitch λ

that count is an equal.

It is shown that V is restricted to a value with a top as, as for drawing 12, ratio λ/λ approaches infinity to each ratio of d/λ . This behavior is contrastive with the behavior of the conventional-type step index fiber that V also becomes infinity as r/λ becomes infinity. Unlike the conventional-type step index fiber, a large-sized core photon crystal fiber follows, and it is made so that it may become a single mode also for the structure of which scale. Therefore, in d , if this fiber fixes the ratio of d/λ as a diameter of a hole 6, it will serve as a single mode also to the value of which pitch λ .

With the property, a large-sized core photon crystal fiber becomes a thing suitable for use with some applications including the use as a high-power communication link, a high-power fiber amplifier, and a high-power fiber laser. Since big optical power is sent out towards the application on industries, such as laser processing, and the application on medicine, a fiber can also be used again.

[Translation done.]

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公表特許公報 (A)

(11) 特許出願公表番号

特表2002-506533

(P2002-506533A)

(43) 公表日 平成14年2月26日 (2002. 2. 26)

(51) Int.Cl. ⁷	識別記号	F I	テマコード [*] (参考)
G 0 2 B 6/00	3 7 6	G 0 2 B 6/00	3 7 6 Z
6/16		6/16	
6/20		6/20	Z
H 0 1 S 3/06		H 0 1 S 3/06	B
3/10		3/10	Z
		審査請求 未請求 予備審査請求 有	(全 33 頁)

(21) 出願番号 特願平11-505360
 (86) (22) 出願日 平成10年6月17日 (1998. 6. 17)
 (85) 翻訳文提出日 平成11年12月27日 (1999. 12. 27)
 (86) 国際出願番号 P C T / G B 9 8 / 0 1 7 8 2
 (87) 国際公開番号 W O 9 9 / 0 0 6 8 5
 (87) 国際公開日 平成11年1月7日 (1999. 1. 7)
 (31) 優先権主張番号 9 7 1 3 4 2 2 . 5
 (32) 優先日 平成9年6月26日 (1997. 6. 26)
 (33) 優先権主張国 イギリス (G B)

(71) 出願人 イギリス国
 イギリス国 ハンプシャー ジュー14
 0エルエックス ファーンボロー アイヴ
 エリー ロード (番地なし) ディフェンス
 エヴァリュエーション アンド リサー
 チ エージェンシー
 (72) 発明者 パークス ティモシー アダム
 イギリス パース ビーエイ2 7エイワ
 イ クレイヴァートン ダウン (番地な
 し) ユニヴァーシティ オヴ パース
 スクール オヴ フィジックス
 (74) 代理人 弁理士 中村 稔 (外9名)

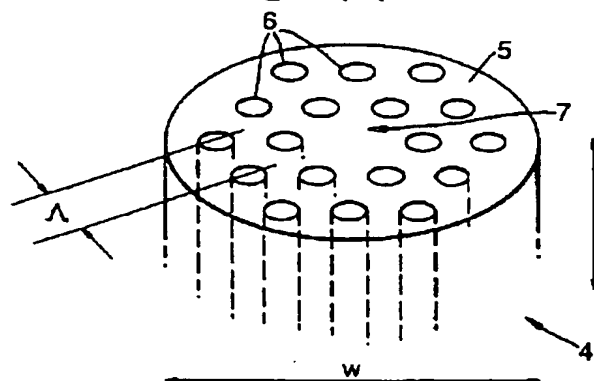
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 単一モード光ファイバー

(57) 【要約】

実質的に透明なコア材料から成り、コア直径が少なくとも 5μ のコアを有する放射を伝送するための大型コア光子クリスタルファイバーに関する。このファイバーは又、コア材料の長さを取り巻くクラディング領域を含み、前記クラディング領域は第1屈折率を有する実質的に透明な第1クラディング材料から成り、前記実質的に透明な第1クラディング材料にはその長さに沿って実質的に周期的な配列の穴が埋封されており、また、前記穴には第1屈折率よりも小さい第2屈折率を有する第2クラディング材料が充填されており、前記光ファイバーへの放射入力のコア材料の長さに沿って単一モードの伝播で伝送されるようになっている。好ましい実施例では、コア直径は少なくとも 20μ であり、 50μ 程の大きさであってもよい。本ファイバーは伝播を単一モードで維持しながら、従来型ファイバーよりも高いパワー放射を伝送可能である。前記コア材料は、ファイバー内へのポンプ放射入力の動作下で増幅が可能な材料でドーピングされている。また、本発明は、ドーピングされた大型コア光子クリスタルファイバーから成るファイバ

Fig.2(a).



【特許請求の範囲】

1. 放射を伝送するための光ファイバーであって、

実質的に透明なコア材料から成り、コア屈折率 n と長さ l とを有し、少なくとも $5\ \mu\text{m}$ のコア直径を有するコアと、

前記長さのコア材料を取り巻くクラディング領域であって、前記クラディング領域は第1屈折率を有する実質的に透明な第1クラディング材料から成り、前記実質的に透明な第1クラディング材料にはその長さに亘り実質的に周期的な配列の穴が埋封されており、前記穴は第1屈折率よりも小さな第2屈折率を有する、そのようなクラディング領域とから成り、

光ファイバーへの放射入力、コア材料の長さに沿って単一モードの伝播で伝送されるようになっていることを特徴とする光ファイバー。

2. 前記穴が直径 d を有し、且つピッチ Λ の間隔で設けられており、更に、光ファイバーは、実質的に固定された d/Λ 比率に対し、ピッチ Λ が何れの値であっても入力放射波長に関わりなく単一モードであることを特徴とする、上記請求項1に記載の光ファイバー。
3. 前記実質的に透明な第1クラディング材料が、前記コアの屈折率より小さい屈折率を有することを特徴とする上記請求項1に記載の光ファイバー。
4. 前記コア直径が少なくとも $10\ \mu\text{m}$ であることを特徴とする、上記請求項1に記載の光ファイバー。
5. 前記コア直径が少なくとも $20\ \mu\text{m}$ であることを特徴とする、上記請求項4に記載の光ファイバー。
6. 前記配列中の少なくとも1個の穴が無く、そこに光ファイバーのコアが形成されることを特徴とする、上記請求項1に記載の光ファイバー。
7. 前記実質的に透明な第1クラディング材料が実質的に均一な第1屈折率を有することを特徴とする、上記請求項1に記載の光ファイバー。
8. 前記コア材料が実質的に均一なコア屈折率を有することを特徴とする、上記請求項1に記載の光ファイバー。
9. 前記コア材料と前記実質的に透明な第1クラディング材料が同一であるこ

とを特徴とする、上記請求項1に記載の光ファイバー。

10. 前記コア材料と前記実質的に透明な第1クラッド材料の内少なくとも1つがシリカであることを特徴とする上記請求項1に記載の光ファイバー。
11. 前記穴の直径がファイバー中を案内されることになる光の波長より小さくないことを特徴とする、上記請求項1に記載の光ファイバー。
12. 前記穴が真空であることを特徴とする、上記請求項1に記載の光ファイバー。
13. 前記穴が第2クラッド材料で充填されていることを特徴とする、上記請求項1に記載の光ファイバー。
14. 前記第2クラッド材料が空気であることを特徴とする、上記請求項13に記載の光ファイバー。
15. 前記第2クラッド材料が液体であることを特徴とする、上記請求項13に記載の光ファイバー。
16. 前記第2クラッド材料が実質的に透明な材料であることを特徴とする、上記請求項13に記載の光ファイバー。
17. 前記実質的に透明なコア材料がドーパント材料から成ることを特徴とする上記請求項1に記載の光ファイバー。
18. 前記穴が実質的に六角形パターンに配列されていることを特徴とする、上記請求項1に記載の光ファイバー。
19. 信号放射を増幅するためのファイバー増幅器であって、

選択された波長の信号放射を受信して、前記入力放射をその長さに沿って送信するための、上記1から5までの請求項の内の何れかに記載のある長さの光ファイバーであって、コア材料がその長さの少なくとも1部に沿ってドーパント材料を含んでいる、そのようなある長さの光ファイバーと、

前記ドーピングされたコア材料の部分が、ポンプ放射の動作下で信号放射を増幅するように、前記ある長さの光ファイバーへの入力に向けて選択された異なる波長のポンプ放射を放出するための放射のソースと、

前記ある長さの光ファイバー内へポンプ放射を選択的に伝送するための、そしてファイバー増幅器から増幅された信号放射を選択的に出力するための、

波長選択伝送手段とから成ることを特徴とするファイバー増幅器。

20. 前記波長選択伝送手段が、

放射を集束するための入力レンズ及び出力レンズと、

ポンプ放射を光ファイバー内へと選択的に反射するための、そしてファイバー増幅器から出力されるべき増幅された信号放射を選択的に伝送するためのダイクロイックミラーとから成ることを特徴とする、上記請求項19に記載のファイバー増幅器。

21. 前記波長選択伝送手段が、波長依存性応答を有するファイバー方向性結合器から成ることを特徴とする、上記請求項19に記載のファイバー増幅器。

22. 前記ドーパント材料が、希土類イオンから成ることを特徴とする、上記請求項19から21の内の何れかに記載のファイバー増幅器。

23. 前記希土類イオンが、エルビウムイオンであることを特徴とする、上記請求項22に記載のファイバー増幅器。

24. レーザー放射を出力するためのファイバーレーザーであって、

選択された波長を有するレーザー放射をその長さに沿って選択的に伝送するための上記請求項1から5の内の何れかに記載のある長さの光ファイバーであって、コア材料がその長さの少なくとも1部にドーパント材料を含んでいる、そのようなある長さの光ファイバーと、

前記ドーピングされたコア材料の部分が、ポンプ放射の動作下でレーザー放射を増幅するように、前記ある長さの光ファイバーへの入力に向けて選択された異なる波長のポンプ放射を放出するための放射のソースと、

前記ある長さの光ファイバー内へポンプ放射を選択的に伝送するための、そしてファイバーレーザーから増幅されたレーザー放射を選択的に出力するための波長選択伝送手段と、

前記増幅されたレーザー放射が前記ある長さの光ファイバーに沿い繰り返して通過し、更に増幅されるように、増幅されたレーザー放射の一部を選択的にフィードバックするためのフィードバック手段とから成ることを特徴とするファイバーレーザー。

25. 前記ドーパント材料が、希土類イオンから成ることを特徴とする、上記請

求項24に記載のファイバーレーザー。

26. 前記希土類イオンがエルビウムであることを特徴とする、上記請求項25に記載のファイバーレーザー。

27. 前記波長選択伝送手段及び前記フィードバック手段が共に2つのダイクロイックミラーから成っており、ダイクロイックミラーのそれぞれは光ファイバーの長さに沿って異なる位置に置かれ、ドーピングされたコア材料は2つのダイクロイックミラーそれぞれの位置の間に置かれることを特徴とする、上記請求項24に記載のファイバーレーザー。

28. 前記フィードバック手段及び前記波長選択伝送手段が共に、ドーピングされたコア材料が2個のファイバー格子の間に置かれるように、光ファイバーの長さに沿って2つの位置に形成された2個の格子から成ることを特徴とする、上記請求項24に記載のファイバーレーザー。

29. 前記フィードバック手段が、ドーピングされたコア材料を有するある長さの光ファイバーの一方の端から現れる光を、前記ある長さの光ファイバーのもう一方の端へと方向づけるための手段から成ることを特徴とする、上記請求項24に記載のファイバーレーザー。

30. 単一モードの伝播で放射を伝送するためのシステムであって、

ある長さの光ファイバー各々が、前のある長さの光ファイバーから順次入力放射を受信し、後のある長さの光ファイバーへ順次出力放射を送信するように直列的に配置されていて、前記ある長さの光ファイバー各々は、ある長さの光ファイバーにより伝送される放射のパワーを予め設定されたパワー以上に維持するために、ある長さの光ファイバーからの放射出力を増幅するための増幅手段により分離されている、そのような上記請求項1から5の内の何れかに記載の複数のある長さの光ファイバーから成ることを特徴とするシステム。

31. 前記増幅手段が、上記請求項19から23の内の何れかに記載のファイバー増幅器から成ることを特徴とする、上記請求項30に記載のシステム。

【発明の詳細な説明】

単一モード光ファイバー

発明の属する技術的分野

本発明は、従来の手段を使って実現できるものよりも実質的に高いパワーで放射を伝達するのに用いることのできる単一モード光ファイバーに関する。本ファイバーは、これまでの光ファイバーと同じ範囲に対し、より高いパワーで非線形効果又は光学的損傷を被らない。厳密には、本ファイバーは、単一モードファイバーレーザー又は単一モードファイバー増幅器で単一モード導波管として使用できる。

発明の背景

光ファイバーは、ある地点から別の地点へ光を送出するために広く使用され、通信、画像化、センサーの分野に活用されている。通常、典型的な光ファイバーは、長さに沿っては均一であるが、その断面方向に屈折率が変化する透明材料の1本の長い撚線である。例えば、屈折率がより高い中心コア領域は屈折率がより低いクラディング領域に取り巻かれている。このようなファイバーは石英ガラスから作られており、純シリカのクラディングが意図的に不純物を混入して屈折率を上げたシリカ製のコアを取り巻いている。光は、コアとクラディングの間の境界で起きる全内反射の過程によりコア内又はその近くに閉じ込められる。

一般的には、このタイプのファイバーは、伝播がコアに閉じ込められる2つ以上の案内モード（即ち多モードファイバー）をサポートしており、これらのモードは異なる位相速度でファイバーに沿って移動する。しかしながら、コアが著しく小さくされている場合には、たった1個の案内モード、即ち基本モード（例えば単一モードファイバー）の伝播しかコアに閉じ込めない。即ち、ファイバーの発端の条件が変化した場合にも、ファイバー自身が横方向の圧縮や曲げ等の外乱を被る場合にも、ファイバーから出現する光の分配が変化しないということである。通常、波長が1500 nmの単一モード光を搬送するように作られているフ

ファイバーは、直径が9 μm のコアに数パーセントのゲルマニウムドーパントを含んでいる。

最近では、穴の配列がファイバーの長さに沿って埋封されている透明な材料から作られたクラディングを含む光子クリスタルファイバー（PFC）が開発されている（J. C. ナイト他、光学レター21（1996年）1547頁、及びエラータによる光学レター22（1997年）484頁）。穴は横方向に周期配列で配置され、屈折率がクラディングの残りの部分の屈折率よりも低い材料が充填されており、ファイバーのコアはクラディングの周期性を破る透明領域から成っている。通常、コアとクラディングは共に純石英ガラス製で穴には空気が充填している。コアの直径は大凡 $5\mu\text{m}$ 、ファイバー全体の平面から平面の幅は $40\mu\text{m}$ で、穴の間隔は2乃至 $3\mu\text{m}$ である。ファイバーの空気穴の直径が、穴間のピッチ又はスペーシングに比べ十分に小さければ、ファイバーのコアは光を単一モードで案内する。

単一モードファイバーは、ファイバーにより搬送される光信号がたった1つのモードで移動し、それにより多モードファイバーで起きるようなひどい散乱という問題を回避できるという理由により、長距離通信、レーザーパワー送出、及び多くのセンサーアプリケーションの分野において、多モードファイバーよりも有利である。更に、所与波長で、光の強さは単一モードファイバーに亘って単一の滑らかで周知の不変分配に従うことが保証される。このことは、光がどのようにファイバーに発射されるかとか、ファイバーが何らかの外乱を受ける（例：時間変化）かとかには無関係である。

多くのアプリケーションでは、例えば何れのファイバーもその中を通過する光を不可避免的に減衰させることから、光ファイバーが可能な限り多くの光パワーを搬送できることが有益なことである。例えば、検知感度が一定の場合は、ファイバーに対する放射パワー入力を増大させることにより通信リンクの長さを伸ばすことができる。又、光が従来の光学システムを使うのではなくファイバーを経由して経路付けできるなら、産業上のアプリケーションには、より簡素にすることができる高パワーレーザーシステムが幾つもあるであろう。しかしながら、既知の光ファイバーにより所定時間に搬送できる光の量には限りがある。

屈折率の低いクラディング領域に囲まれたコア領域から成る従来のファイバ

ーでは、ファイバー内の光の強さが閾値を超えると、ファイバーが作られている材料は最後には取り返しのつかない損害を被ることになる。強さが低い場合、非線形光学プロセスに依存している多くの明暗度が生じて、ファイバーに害は無くても光信号を劣化させるか又は破壊することにもなりかねない。

これらの問題は、ファイバー中のコアの寸法を大きくすることにより、所与パワーに対するファイバー中の光の強さを減じ、それにより非線形プロセスにとっての閾値に達する以前により大きなパワーが搬送されるようにして、緩和することもできる。しかしながら、コアの直径だけを大きくすると、ファイバーは多モードになる。これは、コアとクラッドの屈折率の差を縮小することにより補償することもできる。しかしながら、その結果、コア全体に亘ってドーピングの均一性を確保することが困難になる。又、屈折率差の小さいファイバーは曲がりで光の損失を受けやすい。従って、コアの寸法を大きくして単一モードファイバーのパワー容量を増加させるにしても、その寸法の範囲には限度がある。

非線形効果の幾つかはコアにドーパントが含まれることにより悪化し、これにより材料がこれらの影響を益々受けやすくなる。より高いパワーでは、ドーピングされたファイバーは、取り返しのつかない損害をより被りやすくなる。ドーパントの存在により、ファイバーはイオン化放射の損害も益々受けやすくなり、これが原子力産業における課題でもある。この課題には、コアを純シリカ製にすることにより立ち向かってきた。全内反射は、クラッドにドーパントを添加してその屈折率を低減させることにより保持され、クラッド内で搬送される光がコア内で搬送されるものよりも少なくなるので、より大きなパワーが搬送できる。しかしながら、ドーピングされたクラッド内を搬送される光も依然存在するという事実により、これにも限界がある。

更に、従来のファイバーでは、高パワーレーザーをファイバーに効率よく連結するには、光が小さなスポットへと集束される必要があり、ファイバーの末端面における強さがコアが大型のものであった場合に比べて大きくなるので、問題が多い。ファイバーの末端面又はその近くに光学上の損傷があれば、その中に発射できる放射のパワーが頻繁に制限を受けることになる(S. W. アリソン他、応

用光学24(1985年)3140頁)。これまでの単一モードファイバーで達成された最大連続波(cw)パワーは、約15Wでしかない。

発明の概要

本発明は、単一モードの挙動を維持しながら、従来型のファイバーを使って高パワー放射を伝送するという両立しない問題を克服する。厳密には、本ファイバーは、ある地点から別の地点へと放射を送出するための導波管として使用してもよいし、ファイバー増幅器又はファイバーレーザーで使用してもよい。本ファイバーは、最大パワーが100W乃至2kWの範囲にある単一モードの放射の伝播をサポートすることができる。更に、コアがドーピングされていなければ、コアは従来型(ドーピングされた)ファイバーに比較して高輝度で取り返しのつかない損傷を被る傾向も低くなる。本ファイバーでは非線形光学プロセスの効果は低減され、ファイバーからの高パワー信号出力は従って劣化を被ることはない。本ファイバーは、小さいビームスポットサイズへと集束する必要も無く、高パワー放射が効率よくファイバー内へと連結される点で有益である。

本発明の1つの態様によれば、放射を伝送するための光ファイバーは、

コア屈折率 n 、長さ l を有し、コアの直径が少なくとも $5\mu\text{m}$ である実質的に透明なコア材料からなるコアと、

コア材料の長さを取り巻くクラッド領域であって、クラッド領域が第1屈折率を有する実質的に透明な第1クラッド材料から成り、実質的に透明な第1クラッド材料にはその長さに亘り実質的に周期的な配列の穴が埋封されており、その穴は第1屈折率よりも小さな第2屈折率を有する、そのようなクラッド領域とから成っているので、

光ファイバーへの放射入力、コア材料の長さに沿って単一モードの伝播で伝送される。

穴の直径が d で、ピッチ Λ だけ間隔が離れているとすれば、 d/Λ は実質的に固定比率なので、光ファイバーは、ピッチ Λ が如何なる値であっても入力放射波長と関係なく単一モードとなる。本発明は、従って、従来型ファイバーを使って実現できるであろうものに比較して、拡大された波長範囲に亘る何れの波長に対

しても、ファイバーを単一モードにすることができるという利点を提供する。これは、拡大された範囲の何れの波長に対しても、ファイバーは固定比率 d/A に対する単一モードであり続けるからである。

実質的に透明な第1クラッド材料は、コアの屈折率より小さくない屈折率を有することが望ましい。ある好ましい実施例では、コア直径は、少なくとも $10\ \mu\text{m}$ である。更に別の好ましい実施例では、コアの直径は少なくとも $20\ \mu\text{m}$ である。

本発明のある実施例では、配列中の少なくとも1個の穴が無く、それが光ファイバーのコアを形成するようになっている。穴は概ね六角形に配列されている。

穴は、真空領域であってもよいし、又は第2のクラッド材料を充填していてもよい。例えば、第2クラッド材料は、実質的に透明なら何れの材料でもよく、空気や他の気体(例：水素や炭化水素)、液体(例：水、他の水溶液、又は着色液)、又は固体(例：第1クラッド材料とは屈折率の異なるガラス材料)であってもよい。

実質的に透明な第1クラッド材料は実質的に均一な第1屈折率を有し、コア材料は実質的に均一なコア屈折率を有している。コア材料と実質的に透明な第1クラッド材料は、同一材料でもかまわない。例えば、コア材料と実質的に透明な第1クラッド材料の内の少なくともどちらか一方はシリカであってよい。穴の直径は、ファイバー中を案内される光の波長以上であることが望ましい。

本発明のある実施例では、実質的に透明なコア材料は、例えばエルビウムのような希土類イオンであるドーパント材料を含んでもよい。

本発明の第2の態様によれば、信号の放射を増幅するためのファイバー増幅器は、

選択された波長の信号放射を受信して前記信号放射をその長さに沿って送信するためのここに述べるある長さの光ファイバーであって、コア材料がその長さの少なくとも1部に沿ってドーパント材料を含んでいる、そのようなある長さの光ファイバーと、

前記ドーピングされたコア材料の部分が、ポンプ放射の動作下で信号放射を増

幅するように、当該長さの光ファイバーへの入力に向けて選択された異なる波長のポンプ放射を放出するための放射のソースと、

当該長さの光ファイバーへとポンプ放射を選択的に送信するための、そしてファイバー増幅器から増幅された信号放射を選択的に出力するための、波長選択伝送手段とから成る。

例えば、波長選択伝送手段は、放射を集束するための入力レンズ及び出力レンズと、ポンプ放射を光ファイバー内へと選択的に反射するための、そしてファイバー増幅器から出力されるべき増幅された入力放射を選択的に送信するためのダイクロミックミラーとから成っている。別の例では、波長選択伝送手段は、波長依存性応答を有するファイバー方向性結合器から成っている。

ドーパント材料は、エルビウムイオンのような希土類イオンから成っていてもよい。

本発明の他の態様によれば、レーザー放射を出力するためのファイバーレーザーは、

選択された波長を有するレーザー放射をその長さに沿って選択的に送信するためのここに述べるある長さの光ファイバーであって、コア材料がその長さの少なくとも1部にドーパント材料を含んでいる、そのようなある長さの光ファイバーと、

前記ドーピングされたコア材料がポンプ放射の動作下で信号放射を増幅するように、当該長さの光ファイバーへの入力に向けて選択された異なる波長のポンプ放射を放出するための放射のソースと、

当該長さの光ファイバーへとポンプ放射を選択的に送信するための、そしてファイバーレーザーから増幅された信号放射を選択的に出力するための、波長選択伝送手段と、

前記増幅されたレーザー放射が光ファイバーの長さに沿って繰り返して通過して更に増幅されるように、増幅されたレーザー放射の一部を選択的にフィードバックするためのフィードバック手段とから成っている。

ドーパント材料は、エルビウムイオンのような希土類イオンから成っていてもよい。

ファイバーレーザーのある実施例では、波長選択伝送手段並びにフィードバック手段は共に2枚のダイクロイックミラーから成っていてもよく、それぞれのダイクロイックミラーは光ファイバーの長さに沿って異なる位置に置かれ、ドーピングされたコア材料は2枚のダイクロイックミラーの位置と位置の間に置かれている。

ファイバーレーザーの代わりの実施例では、フィードバック手段と波長選択伝送手段は共に、ドーピングされたコア材料が2個のファイバー格子の間に置かれるように、光ファイバーの長さに沿って異なる2つの位置に形成された2個のファイバー格子から成っている。

本発明のこの態様の別の実施例では、ファイバーレーザーはリング共振器ファイバーレーザーであってもよく、その場合フィードバック手段は、

ドーピングされたコア材料を有する光ファイバーの長さの一方の端から現れる光を、光ファイバーの長さのもう一方側の端へと方向決めするための手段から成っている。

本発明の別の態様によれば、単一モードの伝播で放射を伝送するためのシステムは、

ある長さの光ファイバーそれぞれが、前のある長さの光ファイバーから入力放射を順次受信し、後に続くある長さの光ファイバーに出力放射を順次送信するように連続して配置されており、各長さは、ある長さの光ファイバーにより送信される放射のパワーが予め設定されたパワー以上に維持されるように、ある長さの光ファイバーからの放射出力を増幅するための増幅手段により分離されている、そのようなここに述べる複数のある長さの光ファイバーから成る。

ある好ましい実施例では、増幅手段は、ここに述べるようなファイバー増幅器から成っている。

図面の簡単な説明

本発明につき、これより以下の図面を参照しながら説明するが、それは例示のためのみである。

図1は、従来型ステップインデックス光ファイバーの概略図である。

図2aと2bは、光子クリスタルファイバーの概略図である。

図3は、比較的大きな光子クリスタルファイバーコアへと放射を結合することの利点を示す。

図4は、大型コア光子クリスタルファイバー増幅器を示す。

図5は、図6に示す大型コア光子クリスタルファイバー増幅器に使用される波長選択連結器装置を示す。

図6及び7は、大型コア光子クリスタルファイバーから成るファイバーレーザーの構成を示す。

図8は、大型コア光子クリスタルファイバーを作るために使用されるスタックアンドドロウ加工を示す。

図9は、本発明の、切り開かれ大型コア光子クリスタルファイバーの末端面の中央領域のSEM画像を示す。

図10は図9に示す光子クリスタルファイバーの出力の近傍パターンを示す。

図11は光子クリスタルファイバーの末端面の近傍分配プロットを示す。

図12は光子クリスタルファイバーに関する有効V値を示す。

発明の詳細な説明

図1に関して、従来からのステップインデックスファイバー1は、均一な屈折率 n_2 を有するクラディング材料3により取り巻かれた、均一な屈折率 n_1 と半径 r を有する円形コア2から成る。波長 λ の光に関しステップインデックスファイバー1がサポートする案内モードの数はV値により決まり、ここにVは、

$$V = \frac{2\pi r}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad \text{数式 1}$$

により与えられる。

ファイバーは、Vが2.405より小さいときにのみ単一モードである。従って通常、単一モードファイバーは、Vが2.405よりも小さくなるように操作される。

図1に示すような従来型ステップインデックス光ファイバーでは、ファイバーが作られる材料は、ファイバーに沿って伝播する光の強さが閾値を超える場合、

最終的には取り返しのつかない損害を被ることになる。光の強さが低い場合には、多くの非線形光学プロセスが起きて、光信号を劣化させたり更には破壊する場合もある。これらの問題は、ファイバー1のコア2の寸法を大きくすることにより緩和されるが、コアの半径だけを大きくすれば、ファイバーは多モードになる。従ってこれを補償するために、コア2とクラッドリング3の間の屈折率の差も同時に縮小せねばならない。

コア2とクラッドリング3の屈折率は、材料にドーパントを添加することにより制御できる。その結果、しかしながら、コア領域2に亘ってドーピングの均一性を確保することが困難になる。更には、屈折率の差が小さいファイバーは曲がりて光の損失を受けやすい。従って、ファイバーが伝送できる放射のパワー又はファイバーのパワー容量を増加させるためにコアの寸法を増大させるにしても、その寸法の範囲には限度がある。図2(a)は、従来のファイバーに付随するパワー容量問題を克服する本発明の光ファイバー4を示す。光ファイバー4は、実質的に透明な第1クラッドリング材料5から成り、ファイバーの長さ1に亘り穴6の配列が埋封されている。穴6は横方向に周期的な配列で配置されていて、第1クラッドリング材料よりも小さな屈折率を有する第2の材料が充填されていてもよい。この第2の材料は、固体、液体、又は気体材料でもよいし、代わりに穴は空（即ち真空）にされていてもよい。例えば、コア材料7及び第1クラッドリング材料5は純シリカ製で、穴6には空気が充満していてもよい。

ファイバー断面の実質的に中心には、穴6の配列の周期性を破る実質的に透明な材料のコア領域7がある。例えば、配列の中央穴を無くして、無くなった穴の場所又はその場所の周りの第1クラッドリング材料がファイバー4のコア7を形成するようにする。ファイバーのコアは、図2(b)に示すように直径cを有する。本説明の目的上、ファイバーのコア直径cは、実質的にコアに隣接する1つの穴の中心と、直径上反対側でコアに隣接する穴の中心との間の距離にとる。

穴の配列は（例えば図2(a)に示すような）六角形型パターンを形成しているが、他の穴パターンも考えられる。

従来の光子クリスタルファイバーでは、ファイバーの外側幅wは、 $40\mu\text{m}$ 程度であり、穴の中心間距離（ピッチ Δ ）は大凡 $2\mu\text{m}$ である。固体コア領域

は通常、例えば遠距離通信に使用される従来の単一モードファイバー(図1参照)のコアの直径より小さい $4\text{ }\mu\text{m}$ の直径を有する。しかしながら、この寸法の光子クリスタルファイバーは、通常パワーが10乃至20Wの放射しか伝送できない。従って、このようなファイバーは、出力パワーが少なくとも1kWにはなる、高パワーのレーザーシステムで使用するには向いていない。

本発明の第2の態様によれば、ある地点から別の地点へ放射を送出するための単一モード光ファイバーは、図2に示すような、コア7の直径が少なくとも $5\text{ }\mu\text{m}$ 、望ましくは少なくとも $10\text{ }\mu\text{m}$ である光子クリスタルファイバーから成る。光子クリスタルファイバーのコア直径を大きくすると、伝送できるパワーの量が増える結果となり、コアの直径は、ファイバーの具体的な用途次第であるが、更に大きい、例えば $20-50\text{ }\mu\text{m}$ の範囲にあることが望ましい。本明細書の目的に照らし、中心が少なくとも $5\text{ }\mu\text{m}$ の中央コア7を有する光子クリスタルファイバーを、「大型コア光子クリスタルファイバー」と称することにする。

更には、大型コア光子クリスタルファイバーは、単一モードで放射を伝播することが可能である。従って、本ファイバーは大型のコア寸法により、従来型の光ファイバーを使ってこれまでに実現できたものより高いパワーの放射を、単一モードの伝播で伝送するために使用することができる。

コア直径が $50\text{ }\mu\text{m}$ である大型コア光子クリスタルファイバーは、パワーが大凡2kWの連続波放射をサポート可能である。これは、従来のファイバーで達成された最も良好な実験結果を挿入することにより得られる値に相当する。図1に示すような従来のシリカステップインデックスファイバーでは、永久的な損傷が始まる前に伝送できる放射の最大連続波強さは 100 MW cm^{-2} である(W. ルーシー、光工学34(1995年)2361-2364頁)。 $12\text{ }\mu\text{m}$ のコア直径に対し、この値は唯の100W程度の理論最大パワーにしか相当しない。しかしながら実用上は、理論最大パワーは放射がファイバーに結合されるときに損失が起きることにより著しく減少し、実際には従来の単一モードファイバーで達成された最大連続波(cw)パワーは約15Wに過ぎない。

大型コア光子クリスタルファイバーの更に別の利点は、放射をファイバーに結合することがより容易に実現できる点である。図3(a)と3(b)は、1例と

してレーザー放射8が(a)比較的小さなコアを有する従来型光子結晶ファイバー及び(b)大型コア光子結晶ファイバーへレンズ又はレンズ装置9という手段により入力される状態の概略図を示す。図3(b)に関しては、大型コア光子結晶ファイバー7のコアがレーザー放射の光線の直径に匹敵するようであれば、レンズ9を使用しなくとも放射8をファイバーに入力できる。

単一モード大型コア光子結晶ファイバーは、産業分野で使用される高パワーレーザーシステムに用途があり、例えば、加工される材料に高パワーレーザー放射を照射する必要があるレーザー加工等に応用される。レーザー光線の方向を変えるためにレーザーを動かすのは不便で実用的ではないので、レーザー放射を所定の方向へ案内するために従来の光学器が使用されている。大型コア光子結晶ファイバーは、複雑で嵩張る光学器を必要とせずに、高パワーレーザー放射を案内することができる。

大型コア光子結晶ファイバーは通信にも応用できる。これまでは、(図1に示すような)ある地点から別の地点へと放射を送出するのにある長さの従来の光ファイバーが使用されている。放射の強さはファイバーに沿って伝送されるにつれ減衰するので、ファイバー増幅器又は中継器をファイバーの長さに沿う様々な地点に用いて伝送される放射のパワーを周期的に強めている。このような機器は、光ファイバーリンクのあるセクションから現れる弱い信号(即ちパワーが低くなった信号)を検知して、それを増幅し、この増幅された信号をリンクの次のセクションへ送る。ファイバーがサポートできるパワーが大きいほど、増幅が必要となる前に信号は光ファイバーを通してより遠くまで移動できる。このように、ファイバーが搬送できる最大パワーにより中継器の間隔が決まる。しかしながらファイバーが搬送できる最大パワーは、信号を劣化させることもある強さ依存性の非線形光学効果により制限を受ける。コア区域が大きければ、所与の強さに対してパワーを増加させることができる。単一モードの伝播を依然実現させながら最大ファイバーコア区域を使用できるので、これにより中継器の間隔を最低限にとどめることができる。

所与の検出性能基準に対し、標準的なファイバー用の中継器の間隔は30 kmである(O. オードウィン他、IEEE光子技術レター(1995年)1363

ー1365頁)。大型コア光子結晶ファイバーを放射伝送に使い、ファイバーコアの直径を大凡 $50\mu\text{m}$ にすれば、(光子結晶ファイバーと従来型ファイバーのパワーは同等と仮定した場合)中継器の間隔が160kmまで広がっても十分である。このように、光子結晶ファイバーを使用すれば、より好都合により少ない費用で光信号の伝送がより長い距離に亘って実現できる。又、大型コア光子結晶ファイバーにより、ファイバーリンクは中継器の必要無しに、従来型技術が使われる場合は中継器が必要となるであろう距離に亘って利用できるようになる。

図4に関してであるが、大型コア光子結晶ファイバーは増幅器システム中にも使用できる。大型コア光子結晶増幅器は通常、エルビウムのような少量のドーパント材料でドーピングされたコア(図示せず)を有するある長さのファイバー4から成る。本ファイバー増幅器は、波長選択連結器(WSC)12及びポンプ放射14を放つためのポンプ放射ソース13も含んでいる。ポンプ放射14は、入力放射10の波長に比較して短い波長を有し、WSC12を介してある長さのファイバー4の一方の末端部に投入される。放射ソース11又は前のある長さの光ファイバーからの入力信号放射10は、ある長さのファイバー4へ反対側の末端部で入力される。

WSC12の目的は、別の波長(即ち入力放射波長)の放射をわきへ逸らせることなく、ある波長(即ちポンプ波長)の放射を挿入することである。従ってポンプ放射14は、ファイバー4から何れの信号放射10をも取り出すことなく、信号放射10と同じファイバー4に沿って入力することが可能である。ポンプ放射14はファイバー4のコア内のドーパントイオンを励起するので、入力放射10の波長がより長い場合にゲインを提供する。従って、入力放射10は増幅される。波長選択連結器12は、長波長の入力放射を選択的に伝送し、こうして増幅された出力信号16を生成する。この出力信号16は、ある長さのファイバー15を通して出力される。

商業的に入手できる波長選択連結器は、通常、ある長さの入力ファイバーと出力ファイバーとから成り、その内入力ファイバーは(図1にあるような)従来からのドーピングされたファイバーである。図4の大型コア光子結晶ファイ

パー増幅器では、信号がWSC12へ入力されたりそこから出力される度に強度が失われるのを回避するために、システム内には大型コア光子クリスタルファイバーしか含んでいないことが望ましい。

WSC12はヒューズカブラのような前部がファイバーの装置でもよいし、波長依存性応答を有するなら何れのファイバー方向性結合器でもよい。代わりに、図5に、波長選択連結器として使用できる光学装置17の1例を示す。例えば、光学装置は、入力出力レンズ18a及び18b各々と、ダイクロイックミラー19とから成る。ミラー19は、ポンプ放射14を入力レンズ18aに向けて反射して入力信号放射10を伝送するように角度を付けられている。

(図1に示すような) ステップインデックス光ファイバーから成り、コア直径が $20\mu\text{m}$ で、1nsパルス長のパルス放射を伝送する従来技術の限界を代表するファイバーでは、100kWのピークパワーが実現されている(P. ノーチ他、光ファイバー通信に関する会議(1995年)議事録260-261頁)。ファイバー4が大凡 $50\mu\text{m}$ のコア直径を有する、図4に示す光子クリスタルファイバー増幅器を使用すると、1nsのパルスと少なくとも600kWのピークパワーを有するパルス放射を伝送することができる。

大型コア光子クリスタルファイバーは、他にもファイバーレーザーに活用できる。大型コア光子クリスタルファイバーを使用できるファイバーレーザー装置の構成は他にもたくさんあるが、ファイバーレーザーの利用できる構成2例を図6及び図7に示す。例えば、大型コア光子クリスタルファイバーは、リング共鳴器ファイバーレーザーに使用でき、その場合は、ファイバーの両端は結合されて、レーザー放射がファイバーの「リング」を回って伝送され、継続的に増幅されることになる。

図6に関してであるが、高パワー放射を出力可能なファイバーレーザーは、コア領域(図示せず)にエルビウムのような少量のドーパントを有するある長さの大型コア光子クリスタルファイバー4から成っている。ファイバーレーザーはまた、2枚のダイクロイックミラー、即ち入力ミラー22と出力ミラー23をファイバー4のどちらかの端に含んでいる。ポンプ放射25(例:レーザー)のソースからの放射24は、入力ミラー22を介して入力される。これは、ファイバー

のコア中にエルビウムイオンを励起させることにより、ミラー22、23の間のドーピングされたファイバー領域4にゲインを作り出す。励起されたエルビウムイオンからの自発性発光は、ファイバー4内に、ポンプ放射24よりも波長の長い少量の信号放射を生成する(ファイバー内には図示せず)。この信号放射は、ファイバーに沿って行ったり来たりする度にミラー22、23により反射されて増幅される。

典型的には、ダイクロイックミラー22は、ポンプ放射24を伝送する一方で信号放射の大凡99%を反射するように設計され、出力用ダイクロイックミラー23は、レーザー放射の大凡80%を反射するように設計される。従って、信号放射が出力ミラー23により反射される都度、フラクシオンも出力信号25として出現する。

ファイバーレーザーは、従来どおりに次のある長さの光ファイバーに容易に連結できるファイバーの形態でレーザー放射のソースを提供できるので使い易い。大型コア光子クリスタルファイバーの高パワー能力により、従来型の光ファイバーを使ったものよりもより強力なファイバーレーザー出力が実現できる。

図7にはファイバーレーザーの代わりの構成を示しており、ダイクロイックミラー(図8)の機能を有するファイバー格子26から成っている。この構成は全てがファイバーの装置であるという利点を有している。大型コア光子クリスタルファイバーを含むファイバーレーザーには多くの構成があり、このような装置におけるファイバー利用が図示する2例に限定されるとは意図していない。別の例では、大型コア光子クリスタルファイバーがリング共鳴器ファイバーレーザーに使われ、そこでは大型コア光子クリスタルファイバーの一端はもう一端に連結され、レーザー放射が継続して大型コア光子クリスタルファイバーの「リング」を巡り、継続的に増幅されるようになっている。

大型コア光子クリスタルファイバー4は、通常図8に示すように、石英ガラスの棒から、反復スタック・アンド・ドロー加工を使って作られる(J. C. ナイト他、光学レター21(1996年)1547頁、及びエラータ、光学レター22(1997年)484頁)。図8(a)は、石英ガラス27の円筒形の棒を示しており、その穴6(図8(b))は棒8の長さに沿って中心に開けられている。

その穴から規則正しい距離で棒の外側に6面の平面部が切出されて、棒27を中央穴6周りに六角形の断面を持ったものになっている。棒27は、ファイバードローイングタワーを使ってガラス管28へと延伸成形され、ガラス管28は所要の長さに切断される。ガラス管28はここでスタックされ、図8(c)に示すように亀甲形配列のガラス管が形成され、これがファイバー4を形成する。配列の中央にあるガラス管は中心を通して開けた穴を有しておらず、ファイバー4のコア7を形成する。スタックが完了したガラス管は、ここで、ファイバードローイングタワーを使って最終的なファイバーへと延伸成形される。

代わりの製作技術も使用でき、例えば、円筒形のシリカ細管が利用できれば、これらを基本のファイバー要素として使ってもよい(即ち、既にガラス管28の形になっている細管)。これにより、先に述べたスタック・アンド・ドロ加工の穴あけ段階や切出し段階の手間が省ける。

ファイバー4は、実質的に透明で(図8(b)に示すような)ファイバーへと延伸可能な第1クラディング材料から成る。コア材料は、実質的に透明であれば何れの材料でもよく、必ずしも第1クラディング材料と同一である必要はない。第1クラディング材料の屈折率は、コア材料の屈折率以下ではないことが望ましい。

穴6は空即ち真空でもよいし、或いは何かの材料、即ち第1クラディング材料よりも屈折率が低くファイバーへと延伸可能な第2クラディング材料か、又は穴が既に小さな寸法に延伸成形されている場合はその中に挿入できるような何れの材料が充填されていてもよい。例えば、穴は空気や他の気体(例:水素、炭化水素)、固体(例:第1クラディング材料と異なる屈折率を有する異なるガラス材料)、又は液体(例:水、水溶液、着色液)で満たされていてもよい。穴内の第2クラディング材料は、必ずしも透明である必要はない。本説明より明らかのように、「穴」という語句は、第1クラディング材料内の欠如領域という意味に限定されるものではない。

ファイバー内の空気穴の直径が穴と穴の間のピッチ若しくは間隔に比べ十分に小さければ、ファイバーのコアは単一モードで光を案内する。空気穴の直径は、ファイバー中を案内される光の波長よりも小さいことが望ましい。穴と穴の間隔

はコア直径の4分の1以上且つコア直径の2分の1以下であることが望ましい。穴と穴との間隔は、通常、コア直径の大凡2分の1である。

第1クラディング材料及びコアは均一の屈折率を有していてもよいし、異なる屈折率を有してもよい。例えば、配列の中央穴を欠いたり、他の穴より小さく或いは大きくするだけでなく、他の穴もまた無くしたり異なる材料を充填したりしてもよい。コア7も又、図6及び図7に示すファイバーレーザーでのように、例えばエルビウム又は他の希土類要素等のドーパント材料でドーピングしてもよい。

図9は、切り開かれたPCFの末端面の中央領域のSEM画像を示す。中央穴は無く、直径 $22\mu\text{m}$ のコアは最も内側の6穴により境界が定められる状態になっている。ファイバーは、幅 $180\mu\text{m}$ で相対穴寸法 d/Λ は0.12である。図10は、波長 $458\mu\text{m}$ の入射光用の、図9に示す大型コアPCFの出力における近傍パターンを示す。画像はパターンの中央部で飽和しており、端では特徴が弱くなっているのが分かる。パターンの周囲は凹状で、ここが最も内側の6個の空気穴と接触している所である。

波長 $458\mu\text{m}$ の光がファイバー内に発射され、クラディングモードを取り除くため屈折率を合わせる液が構造に適用された。発射条件が替えられる都度、出力が観察された。多モードは近傍パターン中に励起されず、図5に示すようなPCFの出力は影響を受けなかった。コア直径が入射光の波長の50倍であっても、ファイバーは単一モードのままであった。この結果を 1550nm の波長に縮尺合わせると、コア直径が $75\mu\text{m}$ の同じPCFでも単一モードとなる。

本発明の大型コア光子結晶ファイバーの挙動は、異なる波長でのクラディング5の有効屈折率 n_z の点から理解できる。図11(a)及び11(b)は光子結晶ファイバー4の末端面28の近傍分配プロットを示しており、コア材料7と第1クラディング材料はシリカであり、穴6には空気が満ちている。

図11(b)に関してであるが、長い波長(例: 1500nm)では、ファイバー4を通る光伝播は、穴の配列を十分に映し出さない(図3(b)参照)ので、光の相当部分は空気穴6を伝播する。例えばシリカ及び空気のようなクラディ

ング材料5の有効屈折率は、従って純シリカの屈折率 n_1 （即ち、コア7の屈折率）対して小さくなる。図11（a）に関してであるが、ファイバー4に沿って伝播する短い波長（例：600nm）の光は、穴6の配列を明瞭に映し出し、穴を通り抜けて伝播することから実質的に除外されている。コア7を取り囲むシリカクラディング5の有効屈折率 n_2 は、従って純シリカの屈折率（即ち、コア7の屈折率） n_1 により近い。

従って、数式1に戻るが、ファイバー4を通り抜けて伝播する光の波長が小さくなるほど、波長 λ への明示的依存に基づいてV値は大きくなる。この増加は少なくとも部分的には因数 $(n_1^2 - n_2^2)^{1/2}$ を小さくすることにより補償され、ここ

に n_1 と n_2 は、それぞれ、シリカクラディングの有効屈折率と（コア7の）純シリカの屈折率である。これは、V値を波長にあまり依存しないものにするので、Vがその構造にとっての多モード案内に対する閾値未満になりうる波長範囲を拡大させる。

Vの波長依存性は、小さくなるだけでなく、短い波長に限れば実際に完全に除外される。これについては図12に示しており、穴のピッチ Λ の波長 λ に対する比率の変化に対するファイバーの有効V値（ V_{eff} ）のグラフを示す。各曲線は穴6の直径 d のピッチ Λ に対する所与の比率に対応している。 $V_{eff} - d/\Lambda$ 曲線は、先ずクラディング材料5の有効屈折率 n_1 を計算し、次に数式1から V_{eff} を計算することにより算出される。計算は、コア7の半径がピッチ Λ に等しいものと見なしている。

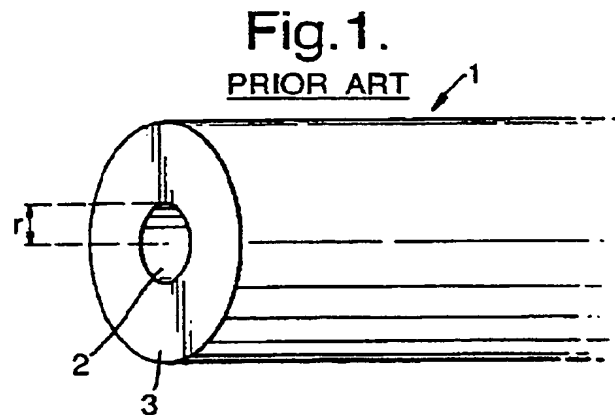
図12は、 d/Λ の各比率に対し、比率 Λ/λ が無限大に近づくにつれ、Vは上がある値に制限されることを示している。この挙動は、 r/λ が無限大になるに従ってVも無限大になるという、従来型ステップインデックスファイバーの挙動と対照的である。従来型ステップインデックスファイバーと違い、大型コア光子クリスタルファイバーは、従って、何れのスケールの構造にとっても単一モードとなるように作られている。従ってこのファイバーは、 d を穴6の直径として d/Λ の比率を固定すれば、何れのピッチ Λ の値に対しても単一モードとなる。

大型コア光子クリスタルファイバーはその特性により、高パワー通信リンク、

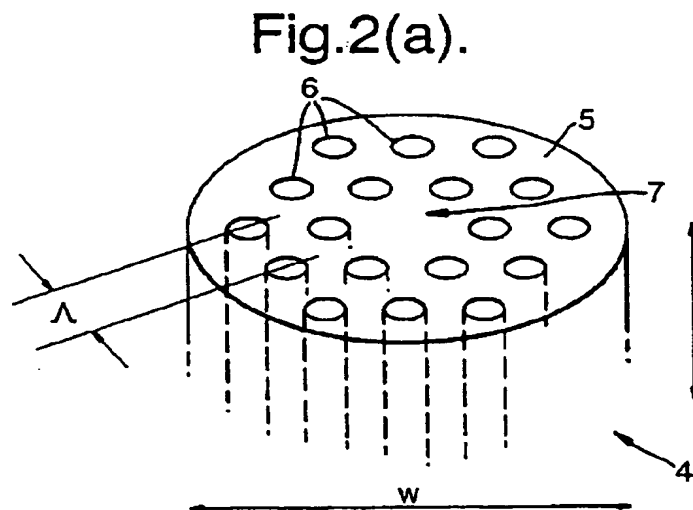
高パワーファイバー増幅器、及び高パワーファイバーレーザーとしての使用を始

めとする幾つかのアプリケーションでの使用に適したものとなる。ファイバーは又、例えばレーザー加工等の産業上のアプリケーション及び医療上のアプリケーションに向け大きな光学パワーを送出するために使用することもできる。

【図1】

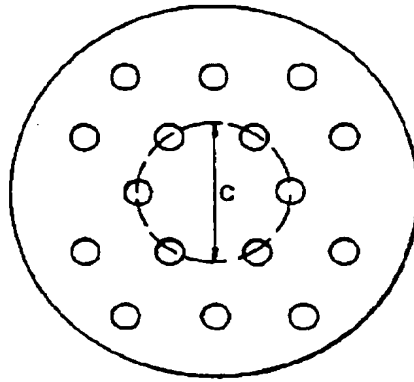


【図2(a)】



【図2】

Fig.2(b).



【図3】

Fig.3(a).

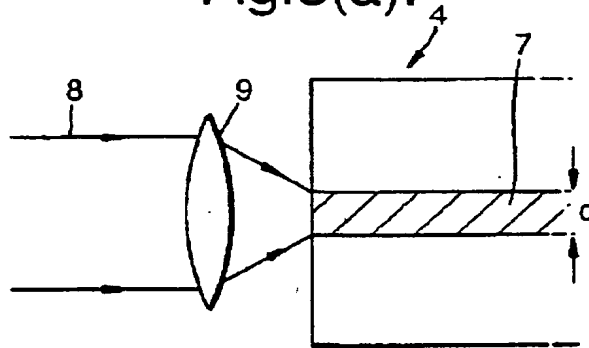
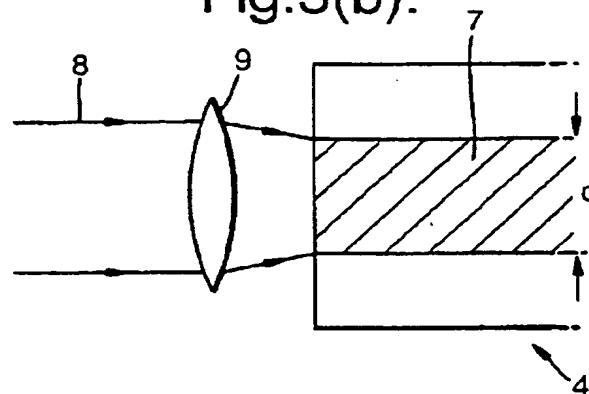
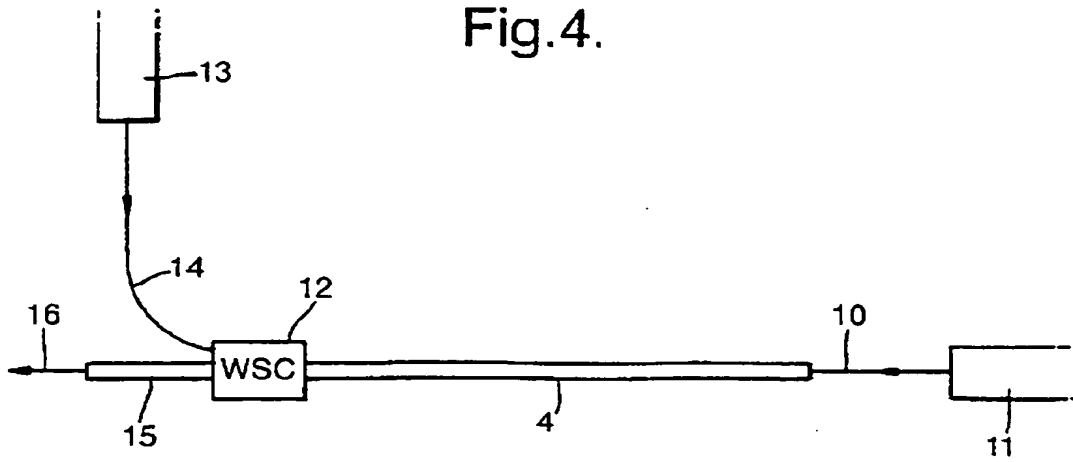


Fig.3(b).



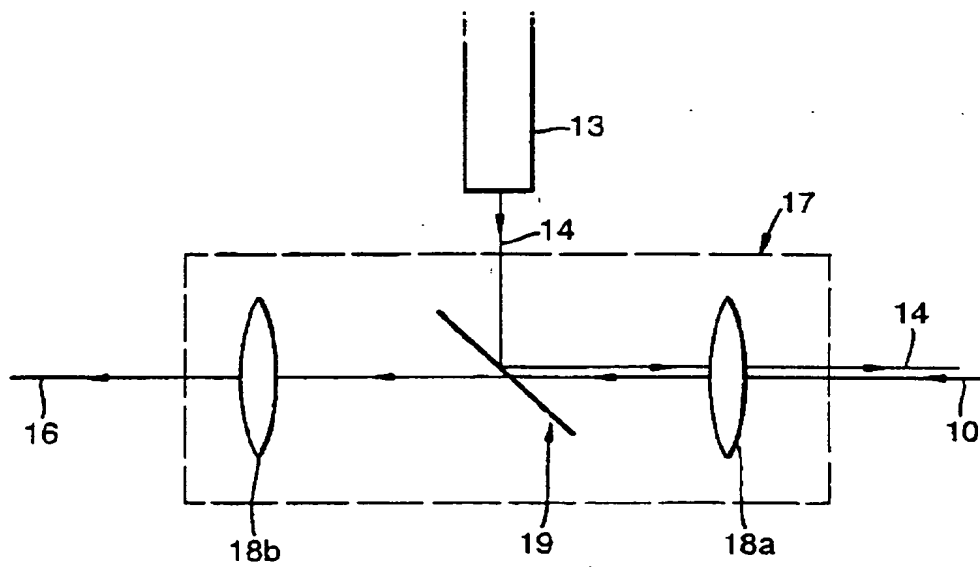
【図4】

Fig.4.



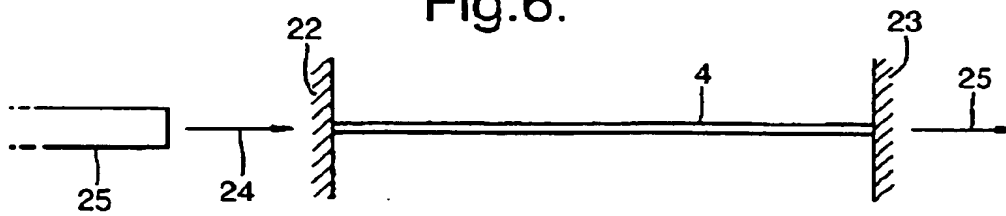
【図5】

Fig.5.



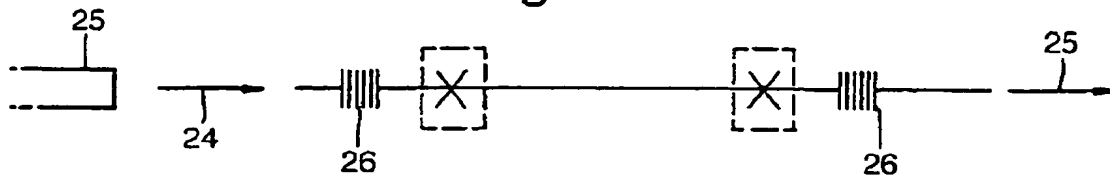
【図6】

Fig.6.



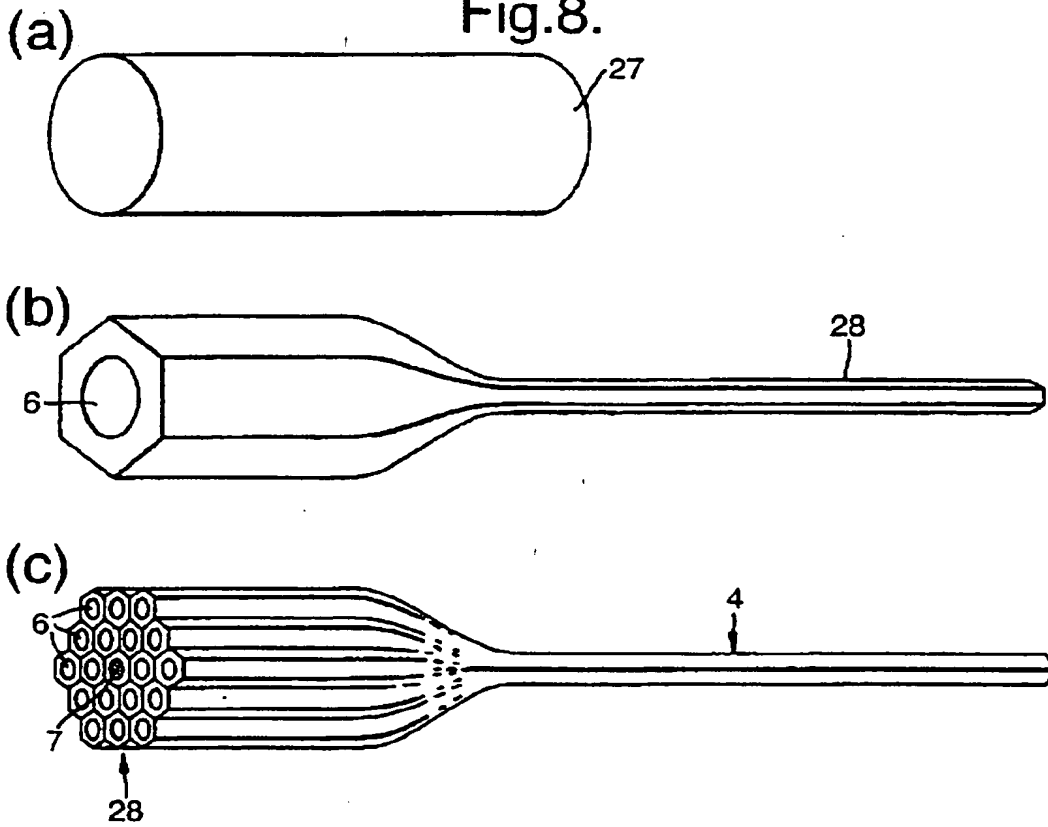
【図7】

Fig.7.



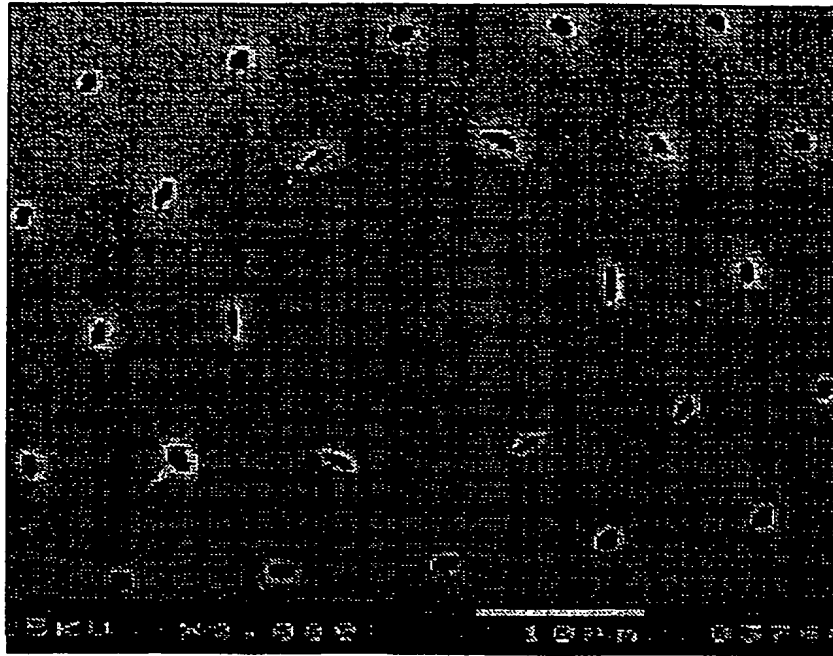
【図8】

Fig.8.



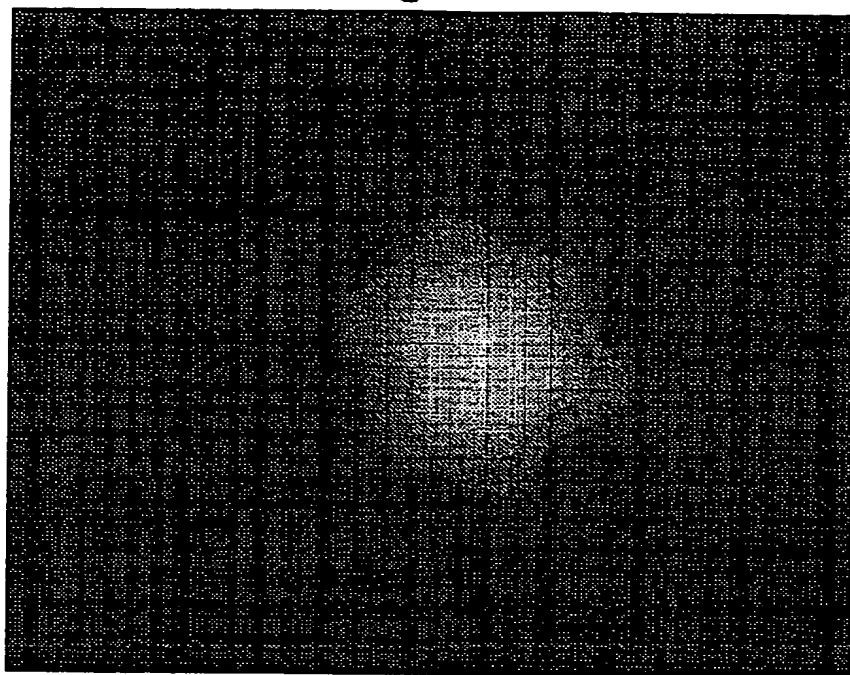
【図9】

Fig.9.



【図10】

Fig.10.



【図11】

Fig.11(a).

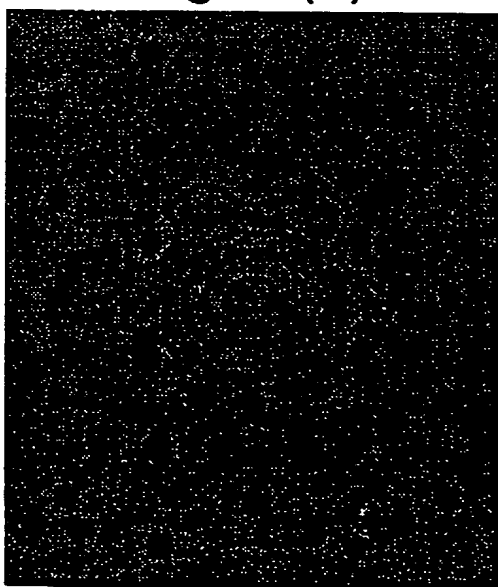
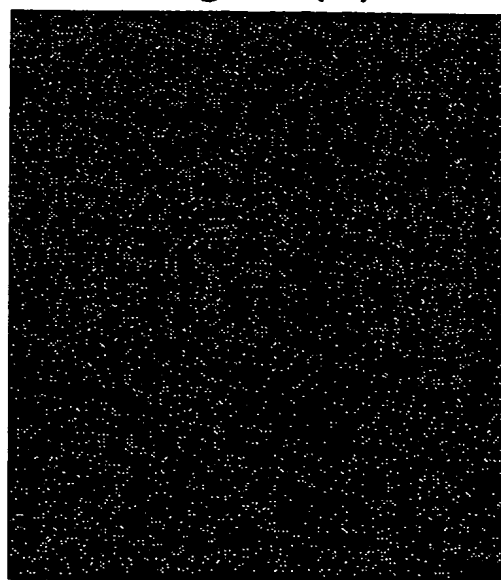
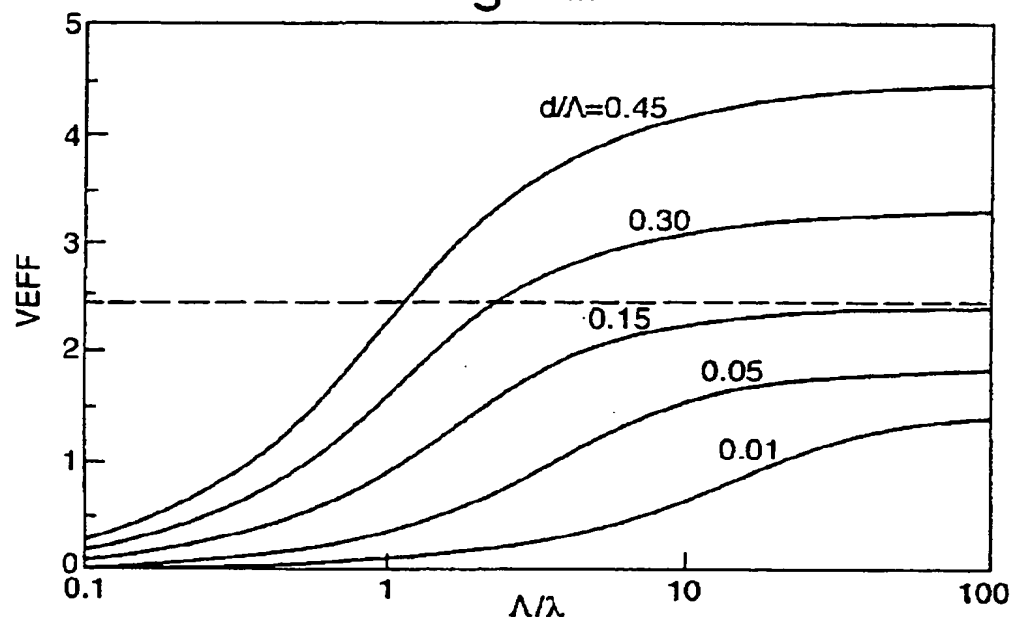
 $\lambda=633\text{nm}$

Fig.11(b).

 $\lambda=1550\text{nm}$

【図12】

Fig.12.



【国際調査報告】

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

national Application No PCT/GB 98/01782	
A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER IPC 6 G02B6/16 G02B6/20 H01S3/06	
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC	
B. FIELDS SEARCHED Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) IPC 6 G02B H01S Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used)	
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT	
Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages Relevant to claim No.
A	BIRKS T A ET AL: "FULL 2-D PHOTONIC BANDGAPS IN SILICA/AIR STRUCTURES" ELECTRONICS LETTERS, vol. 31, no. 22, 26 October 1995, pages 1941-1943, XP000543391 see the whole document 1-14
A	KNIGHT J C ET AL: "ALL-SILICA SINGLE-MODE OPTICAL FIBER WITH PHOTONIC CRYSTAL CLADDING" OPTICS LETTERS, vol. 21, no. 19, 1 October 1996, pages 1547-1549, XP000630414 cited in the application see the whole document 1-14 -/-
<input checked="" type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of box C. <input checked="" type="checkbox"/> Patent family members are listed in annex.	
* Special categories of cited documents: "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance "E" earlier document but published on or after the international filing date "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another claim or other special reason (as specified) "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed "T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art "Z" document member of the same patent family	
Date of the actual completion of the international search 23 September 1998	Date of mailing of the international search report 29/09/1998
Name and mailing address of the ISA European Patent Office, P.B. 2918 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel: (+31-70) 340-2040. Tx: 31 651 epo nl. Fax: (+31-70) 340-3016	Authorized officer Jakober, F

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No.

PCT/GB 98/01782

C.(Continuation) DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	EP 0 621 496 A (ASAHI CHEMICAL IND) 26 October 1994 see abstract; figures 1,2 see column 2, line 37 - line 50	1
A	US 5 323 404 A (GRUBB STEPHEN G) 21 June 1994 see abstract; figures 1,2,5 see column 2, line 35 - column 3, line 3	19-30
A	EP 0 239 772 A (POLAROID CORP) 7 October 1987 see abstract; figure 1 see column 4, line 18 - line 49	19,24

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International Application No

PCT/GB 98/01782

Patent document cited in search report		Publication date	Patent family member(s)		Publication date
EP 0621496	A	26-10-1994	WO	9408261 A	14-04-1994
			DE	69225242 D	28-05-1998
			GB	2302183 A,B	08-01-1997
			US	5471553 A	28-11-1995
US 5323404	A	21-06-1994	EP	0651479 A	03-05-1995
			JP	7181529 A	21-07-1995
EP 0239772	A	07-10-1987	JP	62219678 A	26-09-1987

フロントページの続き

(81)指定国 EP(AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE), OA(BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, ML, MR, NE, SN, TD, TG), AP(GH, GM, KE, LS, MW, SD, SZ, UG, ZW), EA(AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BY, CA, CH, CN, CU, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, GB, GE, GH, GM, GW, HU, ID, IL, IS, JP, KE, KG, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MD, MG, MK, MN, MW, MX, NO, NZ, PL, PT, RO, RU, SD, SE, SG, SI, SK, SL, TJ, TM, TR, TT, UA, UG, US, UZ, VN, YU, ZW

(72)発明者 ナイト ジョナサン ケイヴ
イギリス バース ビーエイ2 7エイワイ
クレイヴァートン ダウン(番地なし)
ユニヴァーシティー オヴ バース
スクール オヴ フィジックス

(72)発明者 ラッセル フィリップ セント ジョン
イギリス バース ビーエイ2 7エイワイ
クレイヴァートン ダウン(番地なし)
ユニヴァーシティー オヴ バース
スクール オヴ フィジックス

【要約の続き】

一増幅器及びファイバーレーザーにも係る。本ファイバーは、システムを通して伝送される放射のパワーが予め設定された閾値パワー以上に維持されるように、大型コア光子クリスタルファイバー増幅器により分離された、複数のある長さの大型コア光子クリスタルファイバーから成る、放射を伝送するためのシステムに使用することもできる。

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning
Operations and is not part of the Official Record**

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ **BLACK BORDERS**
- ☐ **IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES**
- ☐ **FADED TEXT OR DRAWING**
- ☐ **BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING**
- ☐ **SKEWED/SLANTED IMAGES**
- ☐ **COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS**
- ☐ **GRAY SCALE DOCUMENTS**
- ☒ **LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT**
- ☐ **REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY**
- ☐ **OTHER:** _____

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.

